国家重点保护野生植物的保护现状及潜在分布区预测分析

余江洪[1,2]，秦菲[2,3]，薛天天[2,3]，张文笛[2,3]，刘琴[2,4]，安明态[1*]，于胜祥[2,3*]
（1. 贵州大学 林学院，贵阳 550025，2. 中国科学院植物研究所，系统与进化植物学国家重点实验室，北京 100093；3. 中国科学院大学，北京 100049；
4. 中南林业科技大学 林学院，长沙 410004）

摘要：野生植物是自然生态系统的重要组成部分，中国是野生植物种类最丰富的国家之一。研究国家重点保护野生植物的分布特征、保护现状以及潜在分布区，对于支持与制定生物多样性保护策略具有重要意义。本研究基于 1032 种（隶属于 129 科 315 属）国家重点保护野生植物，利用 Top5%丰富度算法识别其热点，并与自然保护区叠加评估其保护成效、确定保护空缺，进而运用 MaxEnt 模型预测了国家重点保护野生植物的潜在分布区分布与变化趋势。研究结果表明：（1）中国南部和西南部是国家重点保护野生植物物种丰富度最高的地区，尤其是四川中部、云南南部和东南部、广西北部、广东北部和海南。（2）热点网格的保护成效分析表明，171 个（85.50%）热点网格得到了有效保护（含 80.5%的物种）；29 个（14.50%）热点网格未得到自然保护区的保护（含 51.2%物种）。（3）通过比较当前与未来气候变化下国家重点保护野生植物的潜在分布区分布，发现未来潜在分布区将向西藏东南部、广西西南部、广东南部以及福建南部等地扩张，而分布在环四川盆地、云南南部和贵州南部等地将缩减。因此，需要加强这些区域生物多样性的动态监测，持续关注气候变化对该区域国家重点保护野生植物的影响。基于本研究所确定的热点网格、保护成效以及与潜在分布区的分析结果，可为国家重点保护野生植物多样性优先保护区的确定和保护政策的制定提供有力的数据支持与参考。

关键词：分布格局，热点地区，保护成效，空缺分析，潜在分布区，气候变化
中图分类号：　　　　**文献标识码：**A　　　　文章编号：

Conservation status and prediction analysis of potential distribution of National Key Protected Wild Plants

YU Jianghong[1,2], QIN Fei[2,3], XUE Tiantian[2,3], ZHANG Wendi[2,3], LIU Qin[2,4], AN Mingtai[1*], YU Shengxiang[2,3*]
(1. *College of Forestry*, *Guizhou University,* Guiyang 55002, China, 2. *State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany*, *Institute of Botany*, *Chinese Academy of Sciences,* Beijing

---

基金项目：国家自然科学基金（32071654）；生物多样性调查评估项目（2019HJ2096001006）；生态环境部生物多样性调查、观测和评估项目（8-3-7-20-9）。[The National Natural Science Foundation of China (32071654); Biodiversity Survey and Assessment Project of the Ministry of Ecology and Environment, China (2019HJ2096001006); Biodiversity Survey, Observation and Assessment Program of Ministry of Ecology and Environment of China (8-3-7-20-9)]

第一作者：余江洪（1996-），硕士研究生，主要从事生物多样性保护与植物分类学研究，（E-mail）yu_jh1996@163.com。
***通信作者：**安明态，博士，正高级实验师，主要从事生物多样性保护和植物分类学研究，（E-mail）gdanmingtai@126.com；于胜祥，博士，副研究员，主要从事植物分类学，生物多样性保护与外来入侵植物研究，（E-mail）yushengxiang@ibcas.ac.cn。

100093, China; 3. *University of Chinese Academy of Sciences,* Beijing 100049; 4. *College of Forestry*, *Central South University of Forestry and Technology,* Changsha 410004, China)

Abstract: Wild plants are an important part of the natural ecological system, and China is one of the countries with the most abundant wild plant species. It is of great significance to study the distribution characteristics, protection status and of potential distribution areas of National Key Protected Wild Plants for supporting and formulating biodiversity conservation strategies. In this study, we built an occurrence database containing 1 032 species (belonging to 315 genera, 129 families) of National Key Protected Wild Plants, then used the top 5% richness algorithm to identify hotspots and evaluate the conservation effectiveness and gaps of current nature reserves. Furthermore, we used maximum entropy (MaxEnt) model to predict the potential distribution and range shifts of National Key Protected Wild Plants. The results were as follows: (1) The areas with the highest species richness of the National Key Protected Wild Plants mainly confined to south and southwest of China, especially central Sichuan, southern and southeastern Yunnan, northern Guangxi, northern Guangdong and Hainan. (2) The conservation effectiveness of hotspot grid cells showed that 171 (85.50 %) hotspots are efficient protection (including 80.5 % of total species) and 29 hotspots (14.50 %) are not effectively protected (including 51.2 % of total species). (3) By comparing the potential distribution of National Key Protected Wild Plants under current and future climate scenarios, we found that potential distribution would expand to southeast of Xizang, southwestern Guangxi, southern Guangdong, and southern Fujian in the future, while those around Sichuan Basin, southern Yunnan and southern Guizhou would shrink. Therefore, it is necessary to strengthen the dynamic monitoring of biodiversity and pay continuous attention to the impact of climate change on National Key Protected Wild Plants in the region. Based on the analysis results of hotspot grids, conservation effectiveness and potential distribution areas identified in this study, strong data support and reference can be provided for the identification of national priority protected areas for National Key Protected Wild Plants diversity and the formulation of conservation policies.
Key words: Distribution pattern, hotspots, conservation effectiveness, gaps analysis, potential distribution area, climate change

野生植物是自然生态系统的重要组成部分，是人类生存和社会发展的重要物质基础，也是国家重要的战略物资。保护野生植物资源是人类实现生态安全和资源安全的重要保障（周志华和金效华，2021），尤其是包含众多濒危物种的国家重点保护野生植物，是当前生物多样性保护的核心部分。自国家重点保护野生植物名录（第一批，1999 年，以下称《名录》（第一批））公布以来，极大地推动了中国植物多样性的保护工作（李志平和唐小平，2006；苑虎 等，2009；权佳等，2009；彭隆等，2013）。时隔 20 余年，2021 年国家颁布了调整后的《国家重点保护野生植物名录》（以下称《名录》（2021 版）），但目前还缺乏对其分布格局、多样性热点、保护成效以及气候变化对其分布影响等方面的研究，为提升其保护成效、支持保护优先管理与决策制定，急需开展相关研究。

在保护资源有限的前提下，尽可能的保护更多的物种，是当前生物多样性保护工作的重要目标（Zhao et al., 2016）。生物多样性热点识别和空缺分析是确定生物多样性保护重点区域、评价保护区的保护状况和提升保护成效最常用的分析手段（Myers, 1988; Scott et al., 1993; Myers et al., 2000; Xu et al., 2017）。关于本地物种、特有物种或濒危物种的生物多样性热点已有了较为充分的研究（Prendergast et al., 1993; Brooks et al., 2006; Jenkins et al., 2013; Zhang

et al., 2015），而关于新版国家重点保护野生植物的热点区域研究仍较为缺乏。

自然保护区是保护生物多样性和维护生态系统平衡的重要途径之一（黄志强等，2014），是保护国家重点保护野生植物物种及其生境最为直接有效的方式（陈雅涵等，2009）。国内依据《名录》（第一批）进行了较多的就地保护评估，如蒋明康等（2006）基于文献资料对306个植物种或类群进行了就地保护评价；苑虎等（2009）以文献资料为基础在全国尺度上，分析了《名录》(第一批)中所列物种的就地保护状况，研究表明国家自然保护区保护了国家重点保护野生植物237种（含变种），占总数的80.07%。相关工作极大地促进和提升了国家重点保护野生植物（第一批）的保护成效。有关《名录》（2021版）的研究却很少开展，仅杨永等（2021）对《名录》（2021版）中的裸子植物分布格局以及保护现状进行了一定分析。除此之外，新版名录所涉及物种的整体保护状况仍然缺乏相对全面的了解。

气候变化或将成为21世纪生物多样性最大的威胁之一（Solomon et al., 2009; Dawson et al., 2011），许多物种分布和种群数量的变化都与气候变化密切相关（Jiang et al., 2016），而地处东亚季风区的我国，是世界上气候变化最为脆弱的地区之一（吴绍洪和赵东升，2020）。因此，评估气候变化对物种分布格局的影响对于生物多样性的保护至关重要（Ferrier, 2002; Graham et al., 2004）。近年来，物种分布模型快速发展，已被广泛用于预测植物物种的空间分布（Kumar et al., 2009; Adhikari et al., 2012）、珍稀濒危物种的适宜生境（Li et al., 2020）、物种多样性的空间格局（Graham et al., 2006）以及评估全球气候变化对物种分布的影响（Li et al., 2015; 张华等，2020）等方面。目前，在气候变化的背景下，关于国家重点保护野生植物在气候变化下潜在分布区变化的研究仅限于少数物种的预测分析（张央等，2021；王国峥等，2020；张琴等，2017），绝大部分的国家重点保护野生植物的当前与未来的潜在分布区缺乏全面的了解。

本研究以国家重点保护野生植物为研究对象，基于大量精准的地理分布数据，开展全国层面上的物种丰富度分布格局研究，采用最大熵模型（MaxEnt）进行潜在分布区的预测分析，进而科学、合理地评估国家重点保护野生植物的保护成效与保护空缺，旨在探讨以下问题：（1）研究国家重点保护野生植物物种丰富度的空间分布格局并识别其多样性热点；（2）科学评估国家重点保护野生植物的保护成效与保护空缺；（3）比较国家重点保护野生植物在当前与未来气候条件下的潜在分布区差异并研究其变化趋势；（4）讨论在气候变化背景下国家重点保护野生植物的保护与管理对策。

1 材料与方法

1.1 物种名录筛选与分布数据库构建

本研究基于国家林业和草原局、农业农村部于2021年发布的《国家重点保护野生植物名录》，包含455种和40类野生植物。虽然《名录》（2021版）有了很大的改进和更新，但仍有一些物种存在明显的分类学问题，有待进一步探讨。例如，西藏柏木（*Cupressus torulosa*）（杨永，2021）和一些近年来基于栽培植株发表的兰科新种（如春花独蒜兰 *Pleione* × *kohlsii*）。因此，本研究在确定研究对象时，主要参考《名录》（2021版），但排除了分类地位不明确、无分布记录的物种。最终，本次研究共涉及国家重点保护野生植物1032种，隶属于129科315属。

基于上述所确定的物种名录，本研究从中国数字植物标本馆（CVH, https://www.cvh.ac.cn/)、*Flora of China*、省级和地方植物志、重要区系或区域名录获取物种分布数据，并下载整合了近年来发表的新种、新记录种等。其次，删除了缺少具体分布信息的记录，保留有精确经纬度数据或详细分布信息的数据，参照《中国地名录》（国家测绘局地名研究所，1997），对具有详细分布地点的数据进行地标化处理使其转化为具有详细经纬度信息的数据。随后，结合物种的省级分布信息，对以上分布数据进行核查、筛选，去除栽

培记录和错误鉴定的信息。本研究最终构建了包括 1032 种国家重点保护野生植物的 92014 条具有经纬度分布信息的地理分布数据库，数据库包括的属性有物种名、拉丁名、属名、科名、经纬度、分布省、分布县、海拔、保护等级和数据来源等基本信息。

1.2 物种丰富度空间分布格局与多样性热点识别

本研究以分辨率为 50 km×50 km 的网格为空间单元，将中国陆地区域划分为 3986 个网格，运用物种丰富度算法计算了每个网格中出现的物种种类以分析国家重点保护野生植物的分布格局（Prendergast et al., 1993）。前人研究表明，5%是常用且普遍接受的阈值（黄建华等，2014；Zhao et al., 2016; Shrestha et al., 2019），因此，本研究将物种丰富度最高的前 5%的网格定义为国家重点保护野生植物物种丰富度的热点。

1.3 保护成效和空缺

根据生态环境部发布的自然保护区名录（http://www.mee.gov.cn）和世界自然保护区数据库（https://www.protectedplanet.net/）的文件，绘制了中国自然保护区图层，包括 464 个国家级自然保护区和 806 个省级自然保护区。利用 ArcGIS 10.6 将所确定的热点网格与自然保护区（国家级和省级）图层叠加，评估当前保护网络对国家重点保护野生植物的保护成效，并确定保护空缺。当热点网格分布有自然保护区时，则认为该网格中的物种受到保护，否则即为保护空缺（Hou et al., 2010; Chi et al., 2017; Yang et al., 2021; Xue et al., 2021）。最终，我们统计了热点网格、保护成效和保护空缺中国家重点保护野生植物的种类。

1.4 气候数据获取及处理

研究中所使用的环境变量包括气候因子和地形因子（海拔）。当前（1960-1990, version 1.4）和未来（2070, CMIP5）的 19 个气候因子从 WorldClim 数据库（https://www.worldclim.org/）中下载。其中，19 个气候数据在 ArcGIS v.10.6 中使用掩膜剪裁工具裁剪并提取中国的气候数据，然后将其转换为 ASCⅡ格式的数据。未来的气候数据选择 IPCC 第 5 次评估报告中 BCC-CSM 1-1 模型下未来四种气候变暖情景中代表 CO_2 最低和最高排放情景的 RCP 2.6 和 RCP 8.5。海拔数据从 DIVA-GIS（http://www.diva-gis.org）数据库中获取。

在最大熵模型构建时，环境变量的多重共线性可能会导致模型过度拟合（Graham et al., 2003; Pearson et al., 2006），从而影响拟合结果的准确性。因此，本研究对构建模型的气候数据进行预处理，利用 SPSS 13.0 对环境变量进行多重共线性分析、检验变量之间的相关性，当两个变量相关性≥ 0.85，仅保留对预测概率贡献较大的变量用于模型运算。经过相关性分析后，最终筛选出 9 个环境变量 bio2（平均昼夜温差）、bio3（等温性）、bio6（最冷月最低温度）、bio7（年温度变化差值）、bio8（雨季平均温度）、bio12（年降雨量）、bio15（降雨量变异系数）、bio17（最干季降雨量）和海拔。

1.5 潜在分布区预测分析

本研究采用最大熵算法 MaxEnt v.3.4.1 对当前和未来气候条件下国家重点保护野生植物的潜在分布区进行建模。当物种分布点小于 5 时会导致模型的预测结果不可靠，我们仅对分布点大于或等于 5 的物种进行模型运算（Pearson, 2006; Tang et al., 2018），涉及 772 种国家重点保护野生植物用于 MaxEnt 模型的预测分析（附录 1）。

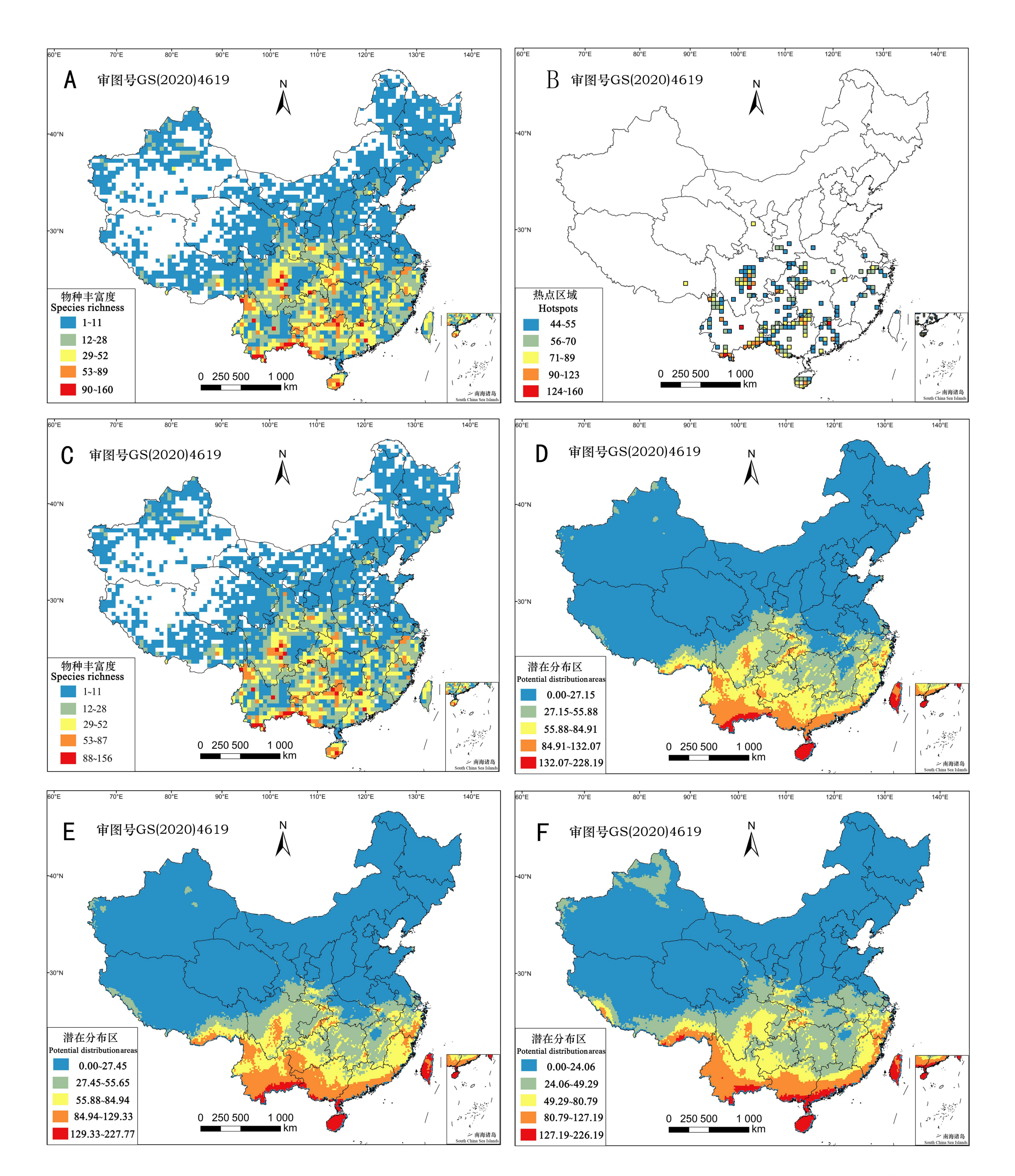
基于 MaxEnt 模型的预测分析中，我们使用了两种方法来构建模型：对有 5-29 个分布点的物种采用刀切法（Pearson, 2006），对超过 30 个分布点的物种采用交叉验证法（Tang et al., 2018）。我们将 75%的分布数据设置为训练集，其余 25%设置为测试集，其他设置设为默认值。模型预测的结果采用受试者工作曲线（receiver operating characteristic curve, ROC 曲线）进行检验，评价标准为 ROC 曲线与横坐标所围面积（AUC 值）（Kumar et al., 2014），AUC 值为 0.5~1，其中 0.7~1 表示模型性能好或极好（Swets, 1988）。为了保证预测结果的准确性，仅选取 AUC 大于 0.70 的物种进行后续分析。利用 ArcGIS 10.6 提取分辨率为 10 min 的不同网格单元内的各个物种的适生值（0~1），适生值越高代表物种在该地区存在的概率

越大。研究表明，适生值大于 0.40 为中度潜在分布区或高度潜在分布区（Yang et al., 2013）。因此，我们将同一网格中不同物种的大于 0.40 的适生值进行求和得到每个网格最终的适生值，以呈现最终的结果。

2 结果

2.1 物种丰富度及热点的分布格局

国家重点保护野生植物物种丰富度空间分布格局的研究表明，68.70%的网格分布有国家重点保护野生植物，物种丰富度最高的网格主要集中分布在中国西南部和南部，包括四川中部、云南南部和东南部、广西北部、广东北部、海南等（图 1：A）。根据 Top5%丰富度算法共确定了 200 个多样性热点网格，这些热点网格主要分布在中国西南部、南部以及东部地区，如四川中部、云南西北部、滇黔桂三省交界处（滇东南、桂西南和黔西南）、桂北黔南、鄂渝湘交界处、华东地区、广东北部与中部地区和海南等地（图 1：B）。本研究所确定的热点包含 81.98%（846 种）的国家重点保护野生植物（图 1：B）。



A.物种丰富度分布格局；**B.**多样性热点；**C.**用于预测分析的 772 种物种的丰富度分布格局；**D.**当前（1960-1990）气候情景下的潜在分布区；**E.**未来（RCP2.6）气候情景下的潜在分布区；**F.**未来（RCP8.5）气候情景下的潜在分布区。

A. The richness distribution pattern of all species; **B.** Hotspots identified based on species richness; **C.** Richness patterns of 772 species used for predictive analysis; **D.** Potential distribution areas under current climate scenario (1960-1990); **E.** Potential distribution areas under future (RCP2.6) climate scenario; **F.** Potential distribution areas under future (RCP8.5) climate scenario.

图 1 国家重点保护野生植物地理分布格局、热点及潜在分布区

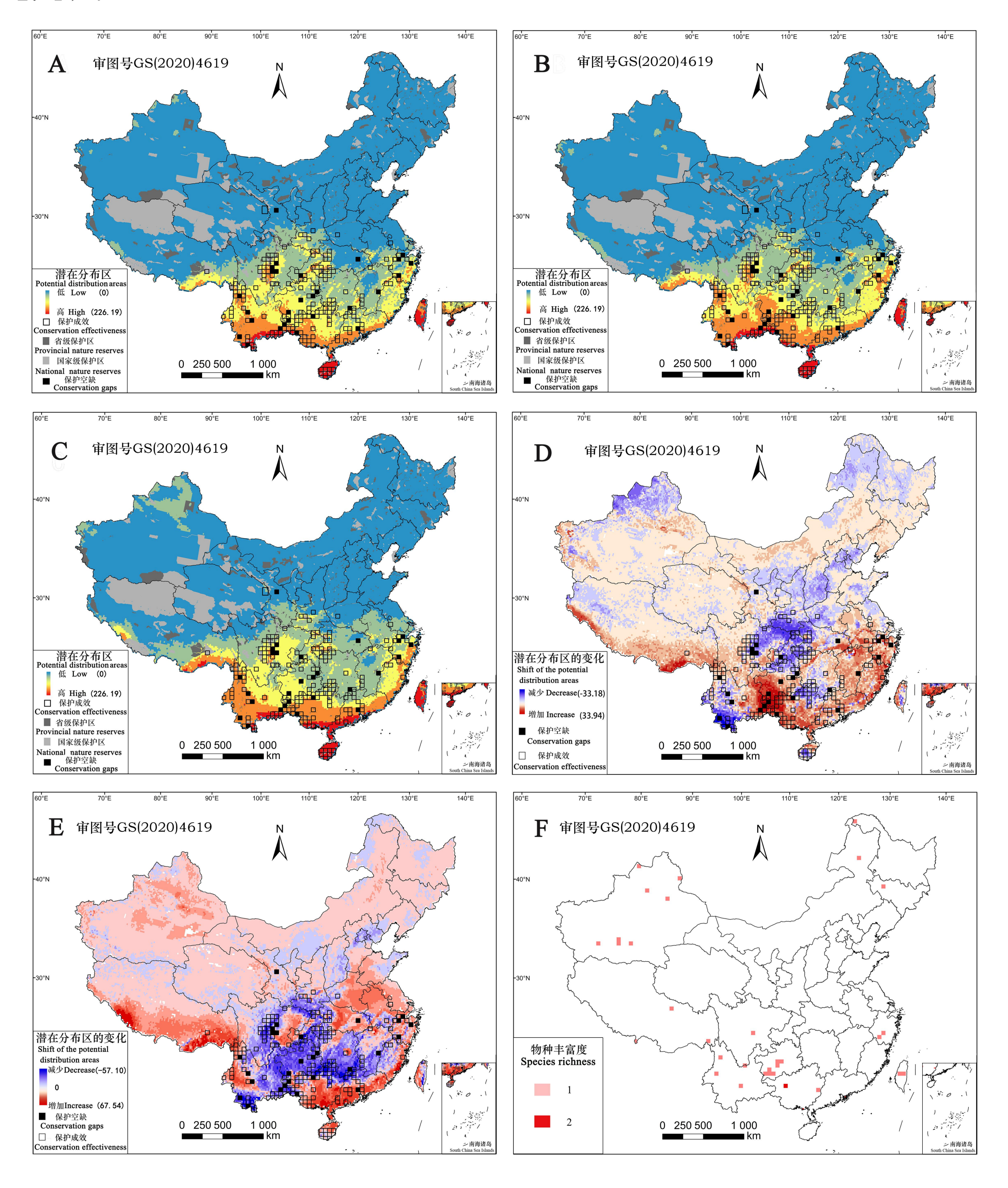
Fig.1 Distribution pattern, hotspots and potential distribution areas of National Key Protected Wild Plants.

2.2 多样性热点的保护成效与空缺分析

保护成效分析表明，有 171（85.50%）个热点网格被自然保护区所覆盖，主要位于四川

中部、云南西北部、滇黔桂三省交界处（滇东南、桂西南和黔西南）、桂北黔南、鄂渝湘交界处、广东北部与中部地区和海南南部等地（图 2：A-C）。保护空缺分析显示，有 29（14.50%）个热点网格未被自然保护区的覆盖，被识别为保护空缺，包含 529（51.23%）种国家重点保护野生植物。这些处于保护空缺的热点网格主要分布于四川中部、滇黔桂三省交界处（滇东南、桂西南和黔西南）和华东地区（图 2：A-C）。

从全国来看，有 55.10%的网格分布有自然保护区，包含 1004（97.30%）种国家重点保护野生植物（图 2：A-C）。此外，针对物种来说，有 28（2.70%）种国家重点保护野生植物完全没有受到自然保护区的保护，主要分布在新疆南部和北部、贵州西南部和中部等地（图 2：F）。



A.当前（1960-1990）气候情景下的潜在分布区的图层叠加 Top5%多样性热点、自然保护区；**B.**未来（RCP8.5）气候情景下的潜在分布区的图层叠加 Top5%多样性热点、自然保护区；**C.**未来（RCP2.6）气候情景下的潜在分布区的图层叠加 Top5%多样性热点、自然保

护区；**D.**未来（RCP2.6）气候情景下潜在分布区变化的图层叠加多样性热点；**E.**未来（RCP8.5）气候情景下潜在分布区变化的图层叠加 Top5%多样性热点；**F.**未受自然保护区保护的物种丰富度分布格局。

A. Layers of the potential distribution area under the current (1960-1990) climate scenario overlayed top 5% diversity hotspots and nature reserves; **B.** Layers of potential distribution areas under future (RCP8.5) climate scenario overlayed top5% hotspots and nature reserves; **C.** Layers of potential distribution areas in future (RCP2.6) climate scenario overlayed top5% diversity hotspots and nature reserves; **D.** Layers of shift of potential distribution under future climate scenario (RCP2.6) overlayed diversity hotspots; **E.** Layers of shift of potential distribution under future climate scenario (RCP8.5) overlayed diversity hotspots; **F**. Distribution of the richness of species unprotected by nature reserves.

图 2 国家重点保护野生植物的保护成效与保护空缺以及潜在分布区变化

Fig. 2 Conservation effectiveness, conservation gaps and shift of potential distribution areas of National Key Protected Wild Plants.

2.3 当前与未来潜在分布区分析

预测分析结果显示，AUC 值大于 0.70 的物种有 769 种，平均 AUC 值为 0.96（附录 1）。用于预测分析的 772 种的格局与所有国家重点保护野生植物分布格局基本一致（图 1：C）。因此，其潜在分布区预测结果可以反映国家重点保护野生植物整体的状况。在当前气候情景下，高质量的潜在分布区主要分布在中国南部，包括云南南部，广西西南部，广东沿海地区，海南和台湾等地（图 1：D）。

未来在 RCP2.6 的气候情景下，高质量的潜在分布区主要分布在中国南部，如云南中南部，广西西南部，贵州西南部，广东沿海地区，海南和台湾（图 1：E），与当前物种潜在分布区相比，在广西西南部、贵州西南部、西藏东南部有明显扩张的趋势。在 RCP8.5 的气候情景下，西藏西南部和东南部、广西和广东南部以及福建、浙江沿海有高质量的潜在分布区（图 1：F），与当前气候情景下的潜在分布区相比，在西藏的东南部和西南部、云南西北部、广西南部和中部、广东西南部和中部和福建南部有明显的扩张。而相比 RCP2.6 的气候情景下的潜在分布区，在西藏的东南部和西南部、云南西北部、广西的东部、广东西南部以及福建南部有明显的扩张，但在贵州西南部与广西西南部有衰减的趋势。

2.4 潜在分布区与多样性热点叠加分析

当前潜在分布区预测结果与热点网格叠加结果显示，绝大多数热点网格处于中低水平的潜在分布区中，如四川中部、云南西北部、广西北部、广东西部、湖南西北部-湖北西南部、贵州北部以及浙江北部；仅有云南的东南部和南部、海南的热点网格处于较为适宜的潜在分布区内（图 2：A）。

在 RCP2.6 的气候情景下，热点网格也主要分布在中低水平的潜在分布区，与当前潜在分布区中热点网格的分布相似，集中分布在中国的西南、华中、华东以及中南地区等（图 2：B）。在 RCP8.5 的气候情景下，潜在分布区的空间分布与在 RCP2.6 的气候情景下相似（图 2：C）。因此，热点网格在在 RCP2.6 与 RCP8.5 的气候情景下的潜在分布区中的分布格局也相似。

2.5 当前与未来气候情况下潜在分布区变化分析

对比当前潜在分布区与 RCP2.6 气候情景下的潜在分布区发现，潜在分布区质量在中国西南部有增加的趋势，包括贵州的南部-云南东部-广西西部边界、西藏的东南部和西南部，而在陕西南部、四川东北部、重庆、湖北西部、云南南部、广西北部、海南南部则呈现出减

少的趋势（图 2：D）。将热点网格与潜在分布区变化的图层叠加分析表明，热点网格处于潜在分布区质量增加的区域主要分布在云南东部-贵州南部-广西西部边界地区，而热点网格内潜在分布区缩减最多区域是云南南部、广西北部、海南南部（图 2：D）。

对比当前潜在分布区与 RCP8.5 气候情景下的潜在分布区发现，潜在分布区质量在中国西部和南部沿海地区有增加的趋势，包括西藏的西南部和东南部、广西东南部、广东南部-中部、福建南部沿海地区和海南北部；而在云南南部和西北部、贵州、环四川盆地、广西北部-湖南南部-广东北部的边界交汇地区则呈现为缩减的趋势（图 2：E）。将热点网格与潜在分布区变化的图层叠加分析显示，热点网格处于潜在分布区质量增加的区域主要在广东南部和中部地区，而热点网格面临潜在分布区质量缩减的区域主要是环四川盆地、云南南部-东南部、贵州东部、广西北部-湖南南部-广东北部边界地区（图 2：E）。

对处于保护空缺的热点网格，在 RCP2.6 的气候情景下，处于滇黔桂交界处的热点网格其潜在分布区质量将明显增加，其他区域的大部分热点网格不管是 RCP2.6 还是 RCP8.5 的气候情景下，将面临潜在分布区质量下降的风险（图 2：D-E）。

3 讨论与结论

3.1 国家重点保护野生植物多样性热点的地理分布格局

国家重点保护野生植物在空间上集中分布于中国的西南及华南等地，这与前人研究所确定的国家重点保护野生植物的热点区域是一致的（张殷波和马克平，2008）。此外，应俊生等（2001）研究中国种子植物多样性中心及热点地区也与本研究热点地区部分覆盖，而且基于更为精准的物种分布数据还识别出一些新的多样性中心，如海南和华东等地也为国家重点保护野生植物重要的热点区域。基于高分辨率的网格化分析，本研究还确认了国家重点保护野生植物多样性热点环四川盆地的分布式样，这种环四川盆地的分布式样在药用植物物种多样性的热点分布格局中也被确认过（Xia et al., 2022）。除此之外，本研究所得到的国家重点保护野生植物多样性热点的分布格局与中国受威胁植物（Zhang et al., 2015）、中国特有种子植物（Huang et al., 2016）以及中国高等植物物种多样性热点（Zhao et al., 2016）有高度的一致性。这种分布格局的形成可能与西南地区地形的高度异质性和适宜植物生长发育的气候条件有关，提供了更多的生态位，增加了物种形成和多样化的可能性。因此，在国家重点保护野生植物的优先保护工作中，既要考虑传统上植物多样性热点区域，还应重视基于高精度的植物分布大数据确认的一些多样性新热点。

3.2 优化保护网络布局提高针对性保护

自然保护区体系是保护国家重点保护野生植物最为有效的方式并发挥了重要作用（Xue et al., 2021; Yang et al., 2021）。本研究结果显示，现有的自然保护区保护了 97.30%的物种，85.50%的热点地区有保护区的分布，这说明当前的自然保护区在国家重点保护野生植物的保护方面发挥了重要的作用。然而，仍然有 14.50%热点网格分布于当前自然保护区的保护网络之外，尤其是四川中部、云南南部和西北部、滇黔桂交界处、贵州的东北部以及浙江北部等地（图 2：A），这些保护空缺地区包含了 51.23%的国家重点保护野生植物，且仍有 28 种完全未被自然保护区所保护（图 2：F）。因此，今后需要在这些地区建立新的保护区以提高国家重点保护野生植物的保护成效。此外，考虑到国家重点保护野生植物具有分布面积狭小，种群数量少，生境破碎化严重，除了扩大现有保护区的规模，还可以因地制宜地建立保护小区、有侧重点地开展迁地保护、近地保护、扩繁回归实验等，从多面加强对国家重点保护野生植物的保护。

3.3 气候变化背景下国家重点保护野生植物的保护对策

气候变化对于物种的分布有着重要的影响，生态位模拟可以预测物种在未来气候变化下

的潜在分布区的分布，对于气候变化下巩固生物多样性的保护具有重要的保护意义。前人对部分国家重点保护野生植物开展的潜在分布区预测显示，气候变化对国家重点保护野生植物的分布有着重大的影响（王国峥等，2020；张央等，2021）。然而，这些研究都是针对个别的物种，对于气候变化对国家重点保护植物的整体影响仍然不清楚。本研究对 772 种国家重点保护植物当前与未来的潜在分布区开展了预测，研究结果显示，高质量的潜在分布区主要分布在中国的南部并沿陆地边境或边界从西向东呈弧状分布，尤其是在云南东南部、广东和广西南部、海南和台湾等地具有相对适宜的潜在分布区。分布于以上区域的热点网格在当前和未来遭受气候变化的影响相对较小，值得考虑建立一些相对长效的保护策略以实现对该地区国家重点保护野生植物的长效保护。

气候变化可引起物种分布的变化，大多数物种将采取迁移策略以适应气候变化（Parmesan & Yohe, 2003）。因此，考虑到本研究识别的大多数热点网格分布于潜在分布区质量相对较低的四川中部、贵州东北部、重庆、湖北、湖南、广西北部、广东北部以及华东浙江等地，且这些区域分布包含了国家重点保护野生植物的众多热点网格，但其潜在分布区的质量处于中低的水平，很可能会出现由于气候变化所引起的物种迁移的挑战。因此，如何实现对现有保护区内的物种的长效保护是今后生物多样性保护的重要任务。因此，加强这些区域生物多样性的动态监测，持续关注气候变化对该区域国家重点保护野生植物的影响，以及进一步评估气候变化对整个区域生物多样性的影响就显得尤其重要。

在气候变化的情景下，大部分自然保护区的保护成效将面临挑战，需要尽早地制定应对气候变化的保护预案。综合考虑国家重点保护野生植物热点网格和潜在分布区的转变，特别是潜在分布区明显缩减的区域。同时，还有众多处于保护空缺中的热点网格也分布在以上提及的区域。因此，这些区域内的热区网格随气候的变化将面临潜在分布区质量的明显下降，宜提前关注、运用积极的预防措施，如加强生态红色、生态屏障建设，保护区域生态系统安全以应对气候变化对国家重点保护野生植物的挑战。

参考文献：

ADHIKARI D, BARIK SK, UPADHAYA K, 2012. Habitat distribution modelling for reintroduction of *Ilex khasiana* Purk., a critically endangered tree species of northeastern India [J]. Ecol Eng, 40: 37-43.

BROOKS TM, MITTERMEIER RA, DA FONSECA GAB, et al., 2006. Global Biodiversity Conservation Priorities [J]. Science, 313(5783): 58-61.

CHEN YH, TANG ZY, FANG JY, 2009. Distribution of nature reserves and status of biodiversity protection in China [J]. Biodiv Sci, 17(6): 664-674. [陈雅涵，唐志尧，方精云，2009. 中国自然保护区分布现状及合理布局的探讨[J]. 生物多样性，17(6): 664-674.]

CHI XL, ZHANG ZJ, XUA XT, et al., 2017. Threatened medicinal plants in China: Distributions and conservation priorities [J]. Biol Conserv, 210: 89-95.

DAWSON TP, JACKSON ST, HOUSE JI, et al., 2011. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate [J]. Science, 332(6025): 53-58.

FERRIER S, 2002. Mapping Spatial Pattern in Biodiversity for Regional Conservation Planning: Where to from Here? [J]. Syst Biol, 51(2): 331-363.

GRAHAM CH, FERRIER S, HUETTMAN F, et al., 2004. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis [J]. Trends Ecol Evol, 19(9): 497-502.

GRAHAM CH, MORITZ C, WILLIAMS SE, 2006. Habitat history improves prediction of biodiversity in rainforest fauna [J]. PNAS, 103(3): 632-636.

GRAHAM MH, 2003. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression [J]. Ecology, 84(11): 2809-2815.

HOU MF, LÓPEZ-PUJOL J, QIN HN, et al., 2010. Distribution pattern and conservation priorities for vascular plants in Southern China: Guangxi Province as a case study [J]. Bot Stud, 51(3): 377-386.

HUANG JH, HUANG JH, LIU CR, et al., 2016. Diversity hotspots and conservation gaps for the Chinese endemic seed flora [J]. Biol Conserv, 198: 104-112.

HUANG JH, LU L, DAI NH, et al., 2014. Diversity and geographical distribution of endemic species of seed plants in China [M]. Beijing: Higher Education Press. [黄建华，陆林，戴年华，等，2014. 中国种子植物特有种的多样性和地理分布[M]. 北京: 高等教育出版社.]

HUANG ZQ, LU L, DAI NH, et al., 2014. Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province [J]. Acta Ecol Sin, 34 (11): 3099-3106. [黄志强，陆林，戴年华，等，2014. 江西省自然保护区发展布局空缺分析[J]. 生态学报，34(11): 3099-3106.]

Institute of Geographical Names, State Bureau of Surveying and Mapping. 1997. Gazetteer of China—An index to the atlas of the People′s Republic of China [M]. Beijing: Sino Maps Press. [国家测绘局地名研究所，1997. 中华人民共和国地图集地名索引[M].北京：中国地图出版社.]

JENKINS CN, PIMM SL, JOPPA LN, 2013. Global patterns of terrestrial vertebrate diversity and conservation [J]. PNAS, 110: 2602-2610.

JIANG HJ, LIU T, LI L, et al., 2016. Predicting the Potential Distribution of *Polygala tenuifolia* Willd. under Climate Change in China [J]. PLoS ONE, 11(9): e0163718.

JIANG MK, WANG Z, QIN WH, et al, 2006. Effectiveness of National Priority Wildlife Protection in Nature Reserves [J]. J Ecol Rural Environ, 22(4): 35-38. [蒋明康，王智，秦卫华，等，2006. 我国自然保护区内国家重点保护物种保护成效评价[J]. 生态与农村环境学报，22(4): 35-38.]

KUMAR S, GRAHAM J, WEST AM, et al., 2014. Using district-level occurrences in MaxEnt for predicting the invasion potential of an exotic insect pest in India [J]. Comp Electron Agric, 103: 55-62.

KUMAR S, STOHLGREN TJ, 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia [J]. J Ecol Nat Environ, 1(4): 094-098.

LI PX, ZHU WQ, XIE ZY, et al., 2020. Integration of multiple climate models to predict range shifts and identify management priorities of the endangered *Taxus wallichiana* in the Himalaya–Hengduan Mountain region [J]. J For Res, 31(6): 2255-2272.

LI R, XU M, WONG MHG, et al., 2015. Climate change-induced decline in bamboo habitats and species diversity: implications for giant panda conservation [J]. Divers Distrib, 21(4): 379-391.

LI ZP, TANG XP, 2006. Local protection of National Key Wild Plants [M]. Beijing: China Forestry Press. [李志平，唐小平，2006. 国家重点保护野生植物就地保护[M]. 北京: 中国林业出版社.]

MYERS N, 1988. Threatened biotas, “Hot spots” in tropical forests [J]. Environmentalist, 8(3): 187-208.

MYERS N, MITTERMEIER RA, MITTERMEIER CG, et al., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities [J]. Nature, 403(6772): 853-858.

PARMESAN C, YOHE G, 2003. A globally-coherent footprint of climate change across natural systems. Nature, 421(6918): 37-42.

PEARSON RG, RAXWORTHY CJ, NAKAMURA M, et al., 2006. ORIGINAL ARTICLE: Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar [J]. J Biogeogr, 34(1): 102-117.

PENG L, CHEN SB, PENG PH, et al., 2013. Geographic Distribution at the County Level and on-site Conservation of National Key Protected Wild Plants in China [J]. For Resource Manag, (5): 31-35. [彭隆，陈圣宾，彭培好，等，2013. 国家重点保护野生植物在县级水平的地理分布及就地保护现状[J]. 林业资源管理，(5): 31-35.]

PRENDERGAST JR, WOOD SN, LAWTON JH, et al.,1993. Correcting for variation in recording effort in analyses of diversity hotspots [J]. Biodivers Conserv, 1(2): 39-53.

QUAN J, OUYANG ZY, XU WH, et al., 2009. Management effectiveness of China nature reserves: status quo assessment and counterm easures [J]. Chin J Appl Ecol, 20(7): 1739-1746. [权佳，欧阳志云，徐卫华，等，2009. 中国自然保护区管理有效性的现状评价与对策[J]. 应用生态学报，20(7): 1739-1746.]

SCOTT JM, DAVIS F, CSUTI B, et al., 1993. Gap analysis, a geographic approach to protection of biological diversity [J]. Wildl Monogr, 123: 1-41.

SHRESTHA N, SHEN X, WANG Z, 2019. Biodiversity hotspots are insufficient in capturing range‐restricted species [J]. Conserv Sci Pract, 1(10): e103.

SOLOMON S, PLATTNER GK, KNUTTI R, et al., 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions [J]. PNAS, 106(5): 1704-1709.

SWETS JA, 1988. Easuring the Accuracy of Diagnostic Systems [J]. Science, 240: 1285-1293.

TANG CQ, MATSUI T, OHASHI H, et al., 2018. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia [J]. Nat Commun, 9(1): 4488.

Wang GZ, Gen QF, Xiao MY, et al., Predicting *Pseudolarix amabilis* potential habitat based on four Niche models [J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(17): 6096-6104. [王国峥，耿其芳，肖孟阳，等，2020. 基于 4 种生态位模型的金钱松潜在适生区预测[J]. 生态学报，40(17): 6096-6104.]

WU SH, ZHAO DS, 2020. Progress on the impact, risk and adaptation of climate change in China [J]. Chin J Popup Resources Env, 30(6): 1-9. [吴绍洪，赵东升，2020. 中国气候变化影响、风险与适应研究新进展[J]. 中国人口·资源与环境，30(6): 1-9.]

XIA C, HUANG Y, QI Y, et al., 2022. Developing long-term conservation priority planning for medicinal plants in China by combining conservation status with diversity hotspot analyses and climate change prediction [J]. BMC Biol, 20(1): 89.

XUE TT, GADAGKAR SR, THOMAS PA, et al., 2021. Prioritizing conservation of biodiversity in an alpine region: Distribution pattern and conservation status of seed plants in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Glob Ecol Conserv, 32: e01885.

XU Y, SHEN ZH, YING LX, et al., 2017. Hotspot analyses indicate significant conservation gaps for evergreen broadleaved woody plants in China [J]. Sci Rep, 7: 1859.

YANG XQ, KUSWAHA SPS, SARAN S, et al., 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills [J]. Ecol Eng, 51: 83-87.

YANG XD, LIU B, BUSSMANN RW, et al., 2021. Integrated plant diversity hotspots and long-term stable conservation strategies in the unique karst area of southern China under

global climate change [J]. For Ecol Manage, 498(119540): 1-16.

YANG Y, TAN C, YANG Z, 2021. Conservation of gymnosperms in China: Perspectives from the List of National Key Protected Wild Plants [J]. Biodiv Sci, 29(12): 1591-1598. [杨永，檀超，杨智，2021. 从《国家重点保护野生植物名录》看我国裸子植物保护[J]. 生物多样性，29(12): 1591-1598.]

YING JS, 2001. Species diversity and distribution pattern of seed plants in China [J]. Biodivers Sci, 9 (4): 393-398. [应俊生，2001. 中国种子植物物种多样性及其分布格局[J]. 生物多样性，9(4): 393-398.]

YUAN H, ZHANG YB, QIN HN, et al., 2009. In situ conservation status of National Key Protected Wild Plants in China [J]. Biodivers Sci, 17(3): 280-287. [苑虎，张殷波，覃海宁，等，2009.中国国家重点保护野生植物的就地保护现状[J]. 生物多样性，17(3): 280-287.]

ZHANG YB, MA KP, 2008. Geographical distribution characteristics of National Key Protected Wild Plants in China [J]. Chin J Appl Ecol, 19(8): 1670-1675. [张殷波，马克平，2008. 中国国家重点保护野生植物的地理分布特征[J]. 应用生态学报，19(8): 1670-1675.]

ZHANG H, ZHAO HX, WANG H, 2020. Potential geographical distribution of *populus euphratica* in China under future climate change scenarios based on Maxent model [J]. Acta Ecol Sin, 40(18): 6552-6563. [张华，赵浩翔，王浩，2020. 基于 Maxent 模型的未来气候变化下胡杨在中国的潜在地理分布[J]. 生态学报，40(18): 6552-6563.]

ZHANG Z, HE JS, LI JS, et al., 2015. Distribution and conservation of threatened plants in China [J]. Biol Conserv, 192: 454-460.

ZHANG Q, ZHANG DF, WU ML, et al., 2017. Prediction the global areas potential distributionof *Gastrodia elata* based on ecological niche models [J]. J Plant Ecol, 41(7): 770-778 [张琴，张东方，吴明丽，等，2017. 基于生态位模型预测天麻全球潜在适生区[J]. 植物生态学报，41(7): 770-778.]

ZHANG Y, WU JY, AN MT, et al., 2021. Geographical distribution pattern and prediction of the distribution of *Paphiopedilum micranthum*in China [J]. Acta Bot Boreal, 41(11): 1932-1939. [张央，武建勇，安明态，等，2021. 中国硬叶兜兰地理分布格局及其潜在分布区预测[J]. 西北植物学报，41(11): 1932-1939]

ZHAO LN, LI JY, LIU HY, et al., 2016. Distribution, congruence, and hotspots of higher plants in China [J]. Sci Rep, 6: 19080.

ZHOU ZH, JIN XH, 2021. Analysis and suggestions on policies and regulations on conservation and management of wild plants in China [J]. Biodivers Sci, 29(12): 1583-1590. [周志华，金效华，2021. 中国野生植物保护管理的政策、法律制度分析和建议[J]. 生物多样性，29(12): 1583-1590.